

СТОК НАНОСОВ РЕКИ ТОМЬ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

О.Г. Савичев

Томский политехнический университет
E-mail: OSavichev@mail.ru

Приведены результаты изучения стока влекомых и взвешенных наносов р. Томи у г. Томска. Показано, что для определения расходов влекомых частиц наиболее целесообразно использовать метод Г.И. Шамова. Установлено, что средний за 1986–2005 гг. суммарный твердый сток у г. Томска (нижнее течение р. Томи) составляет 47,89 кг/с или 1510179 т/год. Большая его часть представлена взвешенными частицами (65,4 %). Средний сток влекомых наносов составляет 16,57 кг/с или 522519 т/год. Приведены рекомендации по проведению руслоисправительных работ.

Введение

Определение стока речных наносов представляет собой сложнейшую научную задачу, рассматриваемую в рамках решения ряда фундаментальных и прикладных водных проблем, связанных с изучением массо- и энергопоток в биосфере, оценкой и прогнозированием состояния водных объектов, предотвращением негативного воздействия вод и разработкой месторождений полезных ископаемых. Сток речных наносов складывается из стока взвешенных (переносимых во всей толще потока) и влекомых (переносимых в придонном слое потока) частиц. Если первая составляющая стока может быть относительно просто измерена, то с определением второй возникают существенные затруднения научного, методического и технического плана. Как следствие этого, в настоящее время отсутствуют достоверные данные о стоке влекомых и суммарных наносов многих рек, включая один из крупнейших притоков Оби – Томь, что существенно затрудняет принятие управленческих решений в области прогнозирования и предотвращения негативного воздействия вод в нижнем течении этого водотока.

Норма водного стока р. Томи в районе г. Томска составляет 1031 м³/с, причем большая его часть (69 %) приходится на период весеннего половодья (апрель – июнь). Примерно до 1960-х гг. на этом участке достаточно часто отмечались заторные и зазорные явления и связанные с ними затопления и подтопления территории г. Томска и окрестных сел [1]. С 1950-х гг. до середины 1980-х гг. непосредственно в речном русле проводилась интенсивная добыча песчано-гравийного материала (ПГМ), ставшая, по мнению ряда авторов, причиной уменьшения на 2,5 м отметок дна, а вслед за ними и уровней воды [2–4]. При этом произошло изменение очертаний береговой линии и русловых образований, в результате которого многие осередки и острова либо исчезли, либо изменились в плане и уменьшились по площади. Примерно в это же время (с 1950-х до середины 1980-х гг.) весенние половодья перестали представлять угрозу для г. Томска в части его затопления. В середине 1980-х г. работы по русловой добыче ПГМ у г. Томска были свернуты, а в конце 1990-х на р. Томи на участке 73...70 км от устья стало отмечаться расширение существующих осередков и их превращение в острова, а на этом фоне – усиле-

ние размыва русла и повышение максимальных уровней воды, не наблюдавшееся около 40 лет [5].

Одно из возможных решений в части предотвращения выявленного в последние годы размыва берегов и гидротехнических сооружений заключается в увеличении пропускной способности русла р. Томи в черте г. Томска за счет изъятия части руслового аллювия и поддержания границ меженного русла на равномерном удалении от берегов. Но для этого необходимы сведения о поступающих на этот участок наносах, на основе которых должен быть спроектирован объем русловых работ, а также информация о стоке наносов в течение года и в многолетнем разрезе. Именно такая задача и была поставлена в данной работе, выполненной по данным русловых съемок ОАО «Томскгеомониторинг», Томского района водных путей и судоходства и материалам гидрологических наблюдений Томского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ТЦГМиМОС), Томского государственного (ТГУ) и Томского политехнического (ТПУ) университетов за 1985–2005 гг.

Методика исследований

Общий сток речных наносов может быть оценен на основе анализа уравнения русловых деформаций, имеющего вид:

$$\frac{\partial G_{вл}}{\partial x} - q_{взв} + m_0 B \frac{\partial z}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где $G_{вл}$ – расход влекомых наносов в объеме беспустотной породы; $q_{взв}$ – расход взвешенных наносов, оседающих на дно или поднимающихся вверх; m_0 – относительная плотность грунтов и наносов; B – ширина реки, м; x – координата продольного перемещения; z – высотная отметка дна; t – координата времени [6–8]. Согласно распространенным в Российской Федерации представлениям [8–12], величина $q_{взв}$ может быть рассчитана по методу А.В. Караушева:

$$q_{взв} = (u + k_u) S_{кон} - k_u S_{взм},$$

где u – гидравлическая крупность наносов, м/с; $S_{взм}$ – мутность взмыва, вычисленная для элемента транзитной струи, г/м³; $S_{кон}$ – средняя мутность воды в конце элемента Δx , г/м³; k_u – коэффициент, определяемый из условия равновесия русла:

$$k_u = \frac{u \Gamma}{1 - \Gamma},$$

где Γ – гидромеханический параметр наносов, вычисляемый для i -й фракции наносов в зависимости от функций $B_i(u_i/v_i; C_{ui})$ и $\Phi_i(u_i/v_i)$ по формуле:

$$\Gamma_i = B_i \cdot \Phi_i,$$

функции B_i и Φ_i определяются интерполяцией по соответствующим графикам из работы [8] в зависимости от гидравлической крупности наносов u_i , вертикальных пульсаций v_i , средней скорости течения и значений коэффициента Шези C_{ui} .

Мутность взмыва $S_{взм}$ (в г/м³) находится по формуле:

$$S_{взм} = 150 a N \eta^2 \frac{\bar{v}^2}{h},$$

$$N = \frac{M C_{ui}}{g},$$

$$M = \begin{cases} 0,7 C_{ui} + 6 & \text{при } 10 \leq C_{ui} \leq 60 \\ 48 & \text{при } C_{ui} > 60 \end{cases},$$

где \bar{h} – средняя глубина водотока, м; a – поправочный коэффициент, определяемый из соотношения средней измеренной мутности $S_{ср.изм.}$ и расчетной транспортирующей способности потока $S_{ср.тр.}$ ($a = S_{ср.изм.}/S_{ср.тр.}$); g – ускорение свободного падения, м²/с²; η – коэффициент перехода от средней скорости потока к донной скорости, вычисляемый по формуле:

$$\eta^2 = \frac{0,53 C_{ui} - 4,1}{C_{ui} - 2}.$$

Транспортирующая способность потока $S_{ср.тр.}$ (г/м³) вычисляется по формуле:

$$S_{ср.тр.} = F \cdot S_{взм},$$

Средняя мутность воды $S_{кон}$ в конце элемента Δx определяется выражением:

$$S_{кон.} = S_{ср.тр.} + (S_{нач.} - S_{ср.тр.}) \exp\left(-\frac{B(u + k_u)}{Q} \Delta x\right),$$

где $S_{нач.}$ – средняя мутность воды в начале элемента Δx , г/м³; Q – расход воды, м³/с.

В случае определения расхода влекомых наносов ситуация менее однозначна – различными авторами предлагаются десятки способов, причем результаты расчета могут отличаться друг от друга на порядки [6, 13, 14]. С учетом этого возникают вопросы, каким методом следует воспользоваться в случае р. Томи и, собственно, каков сток влекомых наносов данного водотока?

Для ответов на указанные выше вопросы был использован следующий алгоритм.

1. По материалам русловой съемки, выполненной Томским участком водных путей и судоходства 20.05.2001 г. и 23.05.2003 г., составлена цифровая модель участка русла р. Томи в верхней части г. Томска.
2. По данным режимных гидрометрических наблюдений Росгидромета, полученным в гидростворе в 74 км от устья р. Томи, выявлены зависимости между расходами воды Q , средней глубиной водотока h , шириной русла B и рассчитаны значения \bar{h} и B за каждый день периода с 20.05.2001 г. по 23.05.2003 г. Затем были вычислены значения

площади живого сечения ω , средней скорости течения \bar{v} , коэффициента Шези $C_{ш}$, коэффициента шероховатости n с поправкой на наличие ледового покрова в зимний период, среднего диаметра частиц донных отложений по формуле Штриккера и граничных значений диаметра донных отложений и влекомых наносов, влекомых и взвешенных наносов согласно [10, 12]. Соотношение между средним диаметром частиц и диаметром частиц с различной обеспеченностью принято по данным, приведенным в работе [15].

3. По вычисленным характеристикам потока вычислялись величина $q_{взм}$ и расходы влекомых наносов в створах 72 км от устья. При этом использовались следующие способы их определения.

- 3.1. Метод И.И. Леви. В соответствии с [6, 11], расчет величины $G_{взл}$ для рек, наносы которых представлены песком и гравием, следует проводить по формуле:

$$G_{взл(Л)} = 0,002 B \bar{d} (\bar{v} - v_{нз}) \left(\frac{\bar{v}}{\sqrt{g \bar{d}}}\right)^3 \left(\frac{\bar{d}}{\bar{h}}\right)^4,$$

где \bar{d} – средний диаметр наносов, м; $v_{нз}$ – неразрывающая скорость (по И.И. Леви), определяемая согласно [11].

- 3.2. Метод Г.И. Шамова. Согласно [8, 10, 16], расчет расхода влекомых наносов при песчаном и песчано-гравелистом составе донных отложений рекомендуется выполнять по формуле Г.И. Шамова:

$$G_{взл(Ш)} = k B \left(\frac{\bar{v}}{v_{нз}}\right)^3 (\bar{v} - v_{нз}) \left(\frac{\bar{d}}{\bar{h}}\right)^4,$$

где k – коэффициент, учитывающий неоднородность состава влекомых наносов (для однородного состава наносов $k=0,95\sqrt{\bar{d}}$); параметр $v_{нз}$ определяется согласно [10].

- 3.3. Метод В.Н. Гончарова. В.Н. Гончаровым показано, что для наносов с диаметром от 0,2 до 10 мм целесообразно применять расчетную формулу в виде:

$$G_{взл(Г)} = 1,2 (1 + \psi) \bar{d} v_{нз} \left(\frac{\bar{v}}{v_{нз}}\right)^{4,33},$$

где параметры ψ и $v_{нз}$ определяются согласно [7].

- 3.4. Метод К.И. Россинского. Согласно [10], для расчета расхода влекомых наносов при гравийно-галечном составе донных отложений рекомендуется использовать формулу:

$$G_{взл(Р)} = 0,2 \rho_n \bar{d} k_p \bar{v} B \left(\varphi - \frac{7,7 \sqrt{\bar{d}}}{k_p \bar{v}} (\varphi - \varphi_e) + 0,4 \theta \exp\left(-\frac{1}{2 \theta^2} \left(\frac{7,7 \sqrt{\bar{d}}}{k_p \bar{v}} - 1\right)^2\right) \right),$$

где коэффициент k_p определяется по специальным графикам в зависимости от относительной шероховатости дна, а коэффициенты φ и φ_e – в зависимости от величин и [10].

- По данным о величинах $q_{\text{взв}}$ и $G_{\text{вл}}$ выполнялся расчет деформаций дна Δz в среднем для расчетного створа по уравнению (1) и вычислялась отметка дна в каждой расчетной точке z_i за каждые сутки расчетного периода ($i=1, \dots, L$); расстояние между расчетными точками – 100 м.
- Определялись характеристики отклонения вычисленных значений отметок дна от измеренных в каждой расчетной точке створа в 72 км от устья по состоянию на 23.05.2003 г. по формулам:

$$\delta_1 = \frac{\sum (z_{\phi,i} - z_{p,i})}{L}, \quad (2)$$

где L – количество сравниваемых точек; z_{ϕ} и z_p – фактические и расчетные отметки дна р. Томи в створе 72 км от устья.

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{\sum (z_{\phi,i} - z_{p,i})^2}{L}}. \quad (3)$$

- На заключительном этапе выполнялся анализ полученных результатов с выбором метода, для которого характерны наименьшие значения δ_1 и δ_2 и рассчитывался сток влекомых наносов за период 1986–2005 гг. Выбор именно этого периода обусловлен тем, что в середине 1980-х гг. была прекращена русловая добыча ПГМ в р. Томи в г. Томске, а зависимости $\bar{h}=\bar{h}(Q)$ и $B=B(Q)$ за это время существенно не изменились [5].

Результаты исследований и их обсуждение

Наилучшая сходимость вычисленных и измеренных отметок дна р. Томи была достигнута при использовании для расчета стока влекомых наносов метода Г.И. Шамова, что позволяет его рекомендовать для расчета стока влекомых наносов рассматриваемой реки. Близкие результаты также получены по формулам И.И. Леви и К.И. Россинского, но в первом случае зафиксирована большая погрешность при расчете суммарных расходов взвешенных и влекомых наносов, а во втором – большая погрешность при расчете расходов влекомых наносов (табл.).

В соответствии с полученными данными, суммарный сток взвешенных и влекомых наносов в среднем за 1986–2005 гг. р. Томи в гидростворе г. Томска оценивается в размере 1510179 ± 55630 т/год или $47,89 \pm 1,76$ кг/с. Большая часть твердого стока представлена взвешенными наносами (987660 ± 50752 т/год или $31,32 \pm 1,61$ кг/с), причем наиболее высокий их вклад в формирование расходов наносов (более 75 %) приурочен к периоду весеннего половодья. Среднегодовой сток влекомых наносов составляет 522519 ± 7772 т/год или $16,57 \pm 0,25$ кг/с.

Для внутригодового распределения твердого стока (в среднем за 1986–2005 гг.) характерна суще-

ственная изменчивость – от 0,74 кг/с в январе до 272 кг/с. Суммарный сток наносов за весеннее половодье (апрель – июнь) составляет 82,5 % от годового стока, в то время как в зимнюю межень (декабрь – март) – всего 0,6 %. В многолетнем разрезе суммарный твердый сток и соотношение влекомых и взвешенных наносов существенно меняются (рис. 1), причем изменения во времени этих показателей в ряде случаев неоднозначно связаны с колебаниями водного стока (рис. 2).

Таблица. Среднеарифметические (δ_1) и среднеквадратические (δ_2) отклонения расчетных значений от фактических, средний расход наносов р. Томи (г. Томск) за период с 20.05.2001 г. по 23.05.2003 г.

№	Створ	δ_1 , м	δ_2 , м	Средний расход наносов, кг/с
1	Учет только взвешенных наносов по А.В. Караушеву	-0,70	0,93	34,26
2	Учет только влекомых наносов по методу Г.И. Шамова	0,18	0,56	18,91
3	Учет только влекомых наносов по методу И.И. Леви	0,18	0,56	14,52
4	Учет только влекомых наносов по методу В.Н. Гончарова	0,19	0,56	55,61
5	Учет только влекомых наносов по методу К.И. Россинского	0,19	0,56	21,02
6	Суммарный расчет влекомых и взвешенных наносов по методам А.В. Караушева и Г.И. Шамова	-0,69	0,93	53,17
7	Суммарный расчет влекомых и взвешенных наносов по методам А.В. Караушева и И.И. Леви	-0,70	0,94	48,78
8	Суммарный расчет влекомых и взвешенных наносов по методам А.В. Караушева и В.Н. Гончарова	-0,70	0,94	89,87
9	Суммарный расчет влекомых и взвешенных наносов по методам А.В. Караушева и К.И. Россинского	-0,69	0,93	55,28

Примечание: значения δ_1 вычислены по формуле (2), значения δ_2 – по формуле (3)

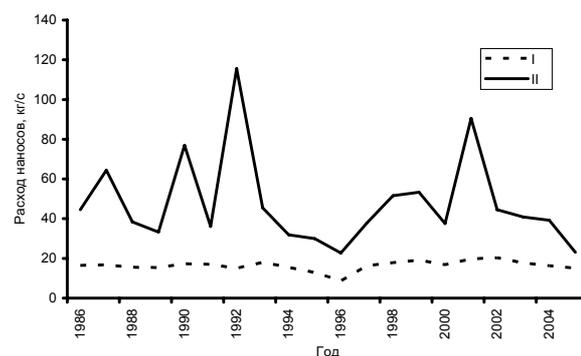


Рис. 1. Изменения среднегодовых расходов влекомых (I) и суммарных (II) наносов реки Томи у г. Томска в течение 1986–2005 гг.

Это объясняется тем, что по мере увеличения водности происходит непропорциональное изменение значений коэффициентов шероховатости, диаметра речных наносов, глубин и скоростей потока. Учитывая данное обстоятельство, а также

трудоемкость расчета суммарного стока наносов указанными выше методами, был выполнен поиск более простых зависимостей между суммарным расходом наносов G_n и гидравлическими характеристиками реки.

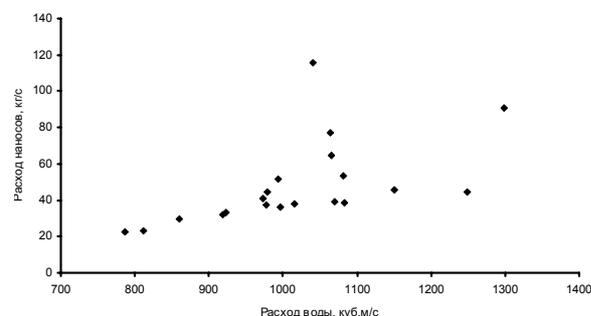


Рис. 2. Зависимость между суммарным расходом наносов и расходом воды р. Томи у г. Томска

Регрессионный анализ массива среднесуточных значений расходов воды Q ($\text{м}^3/\text{с}$), суммарных расходов взвешенных и влекомых наносов G_n ($\text{кг}/\text{с}$), коэффициентов шероховатости n и средних глубин \bar{h} (м) р. Томи в гидростворе г. Томска в мае – октябре 1986–2005 гг. позволили получить выражение (4), позволяющее с допустимой погрешностью (квадрат корреляционного отношения R^2 составляет 0,70) определять среднесуточное значение G_n для исследуемого водотока в период открытого русла и пригодное для проведения гидрологических расчетов не только для участка в пределах г. Томска, но и в целом для нижнего течения р. Томи.

$$G_n = Q \left(0,0187 + 0,00021 \frac{\bar{h}^2}{n} \right). \quad (4)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марусенко Я.И., Земцов А.А., Семлянская Л.П. и др. Гидрография Западной Сибири. Т. I. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1961. – 169 с.
2. Каменсков Ю.И. Русловые и пойменные процессы. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1987. – 171 с.
3. Дубровская Л.И., Земцов В.А. Изменение уровней реки Томи и грунтовых вод поймы в районе города Томска // Вопросы географии Сибири. – 1997. – Вып. 22. – С. 100–105.
4. Чалов Р.С. Естественные и антропогенные изменения рек России за историческое время // Соровский образовательный журнал. – 2000. – Т. 6. – № 1. – С. 71–78.
5. Лыготин В.А., Савичев О.Г., Нигороженко В.Я. Состояние поверхностных водных объектов, водохозяйственных систем и сооружений на территории Томской области в 2000–2005 гг. – Томск: АГРАФ – ПРЕСС, 2006. – 88 с.
6. Леви И.И. Динамика русловых потоков. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 252 с.
7. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеоздат, 1962. – 374 с.
8. Караушев А.В. Речная гидравлика. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. – 416 с.

В частности, при использовании зависимости (4) для расчета суммарного расхода наносов в 72 км от устья р. Томи значение R^2 составило 0,80.

Заключение

В результате анализа данных многолетних гидрологических наблюдений и математического моделирования русловых деформаций установлено, что для оценки расходов влекомых наносов р. Томи наиболее целесообразно использование метода Г.И. Шамова. Суммарный сток взвешенных и влекомых наносов указанной реки в гидростворе г. Томска, рассчитанный по А.В. Караушеву и Г.И. Шамову, в среднем за 1986–2005 гг. составляет 1510179 ± 55630 т/год или $47,89 \pm 1,76$ кг/с, в том числе сток влекомых наносов, представляющий наибольший интерес с точки зрения формирования запасов песчано-гравийных материалов, – 522519 т/год или $16,57$ кг/с. Очевидно, что при изъятии в пределах г. Томска песчано-гравийных материалов в размере, превышающем погрешность определения стока влекомых наносов (т. е. 7772 т/год), вероятны статистически значимые изменения речного русла. С учетом этого, добыча большего количества песчано-гравийных материалов из русла р. Томи может проводиться только при условии специального обоснования подобных работ, включающего долгосрочный прогноз русловых деформаций и проработку мероприятий по защите берегов реки и гидротехнических сооружений. Ориентировочная оценка краткосрочных изменений расходов наносов и, следовательно, деформаций русла, может быть выполнена с помощью установленной эмпирической зависимости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант Р_ОФИ 06-05-96924).

9. Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод / Под ред. А.В. Караушева. – Л.: Гидрометеоздат, 1981. – 175 с.
10. Международное руководство по методам расчета основных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – 247 с.
11. Руководство по разработке раздела «Охрана окружающей природной среды» в проектах карьеров обводненных месторождений песчано-гравийных материалов. – М.: Минтранс РФ, 1996. – 125 с.
12. Алексеевский Н.И. Гидрофизика. – М.: Академия, 2006. – 176 с.
13. Шамоу Г.И. Речные наносы. Режим, расчеты и методы измерений. – Л.: Гидрометеоздат, 1954. – 341 с.
14. Barry J.J., Buffington, King J.G. A general power equation for predicting bed load transport rates in gravel bed rivers // Water resources research. – 2004. – V. 40. – W 10401. – P. 1–22.
15. Савичев О.Г., Егоров Б.А., Крутовский А.О. и др. Состояние поверхностных водных объектов, водохозяйственных систем и сооружений на территории Томской области в 2001 г. – Томск: ТЦ Томскгеомониторинг, 2002. – 82 с.
16. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов). ВСН 163-83. – М.: Госкомгидромет, 1985. – 143 с.

Поступила 24.01.2007 г.